

## 一种 EDCA 机制分析模型

严军荣<sup>①</sup> 张顺颐<sup>①</sup> 龙华<sup>②</sup> 孙雁飞<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学信息技术研究所 南京 210003)

<sup>②</sup>(昆明理工大学信息与自动化学院 昆明 650051)

**摘要:** 由于 IEEE 802.11e 协议的 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access)机制采用优先级分类和两级冲突, 对其建模分析具有相当大的难度。该文根据 EDCA 机制的特点提出一种简单有效的两级冲突综合模型。利用简单 EDCA 模型推导出的时隙发送概率公式分别计算内部虚拟冲突和外部冲突概率, 将这两种冲突概率进行综合, 最终仿真出饱和条件下复杂 EDCA 模型的吞吐率和时延。仿真结果显示: EDCA 机制采用优先级分类和两级冲突, 不仅可以优先保证音频和视频业务的吞吐率, 而且可以大大降低系统的平均时延。

**关键词:** 无线局域网; 802.11e; 服务质量; EDCA

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0979-05

## An Analytical Model for EDCA Mechanism

Yan Jun-rong<sup>①</sup> Zhang Shun-yi<sup>①</sup> Long Hua<sup>②</sup> Sun Yan-fei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Information Networks Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup>(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Priority classification and two-level collision being adopted, Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanism of IEEE 802.11e protocol is quite difficult to be modeled and analyzed. According to the characteristics of EDCA mechanism, an effective and simple model for two-level collision is proposed. The probabilities of inner virtual collision and outer collision are calculated based on the formula of sending probability deduced from simple EDCA model, and then integrated. Finally, the simulation of throughput and delay of complicated EDCA under saturation is conducted. The simulation demonstrates that EDCA mechanism, which adopts priority classification and two-level collision, can not only preferentially guarantee the throughput of voice and video, but also greatly decrease the average delay of the system.

**Key words:** Wireless local area network; 802.11e; Quality of Service (QoS); Enhanced distributed channel access

### 1 引言

IEEE 802.11e 协议<sup>[1]</sup>中的 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access)机制(D5.0 之前称为 EDCF)是 Fischer 等人<sup>[2]</sup>2001 年在“QoS 基准提议”(802.11e/D1.0)中提出的。EDCA 机制对 IEEE 802.11 协议<sup>[3]</sup>的 DCF 机制进行两大改进。采用优先级分类: 指定语音、视频、尽力而为和后台等 4 种服务类型来对应不同优先级的访问类别(AC); 增加内部虚拟冲突: 一个 QSTA 内可以同时有 4 个传送队列(对应 4 种 AC 业务和 4 个随机退避状态机 EDCAF[AC]), 一个 QSTA 内 EDCAF[AC]之间的冲突在同一个 QSTA 里解决, 更高优先级的 AC 得到发送机会, 低优先级的 AC 进行退避, 表现得和外部冲突一样。

DCF 机制是 EDCA 机制的基础。关于 DCF 机制的研究主要集中在 1998 年至 2002 年, 最重要的分析模型是 Bianchi<sup>[4,5]</sup>提出的一种用来计算饱和条件下吞吐率的二维 Markov 链模型; Wu<sup>[6]</sup>在 Bianchi<sup>[5]</sup>的模型中增加重传次数限制; Ziouva<sup>[7]</sup>在 Bianchi<sup>[5]</sup>模型的基础上增加退避冻结状态, 提出三维 Markov 链模型。

随着 EDCA 机制的提出, 相关的研究也比较多。Hui<sup>[8,9]</sup>把 Bianchi<sup>[5]</sup>的模型与 Cali<sup>[10,11]</sup>提出的一种 p 坚持的 Markov 链模型和 Tay<sup>[12]</sup>的平均值数学模型(DCF 机制的 3 种主流研究模型)统一起来, 提出一种统一的模型对 EDCA 的吞吐率和时延进行分析; Xiao<sup>[13,14]</sup>在 Bianchi<sup>[5]</sup>和 Ziouva<sup>[7]</sup>模型基础上, 针对 EDCA 的特点提出改进模型; 文献[15,16]等针对 EDCA 机制提出各自的研究模型。上述文献主要对 EDCA 机制的优先级分类进行建模分析, 却没能对两级冲突提出有效的分析模型。

本文在 Bianchi<sup>[5]</sup>的二维 Markov 链模型基础上, 根据

2006-09-20 收到, 2007-03-23 改回

国家“863”计划(2005AA121620)和江苏省高新技术研究计划(BG2003001)资助课题

EDCA 机制的特点, 提出两级冲突综合模型。遵循由简单到复杂的原则, 通过构造 EDCAF[AC]和简单 EDCA 模型, 最终构造出综合内部虚拟冲突和外部冲突的复杂 EDCA 模型; 构造了退避时延模型和冲突时延模型; 采用 802.11b 的 DSSS 系统参数对 EDCAF[AC]、简单 EDCA 和复杂 EDCA 模型进行吞吐率和时延仿真。

## 2 EDCAF[AC]模型

考虑每个 QSTA 内仅有 1 个 EDCAF[AC]且所有 QSTA 内的 EDCAF[AC]为同种 AC 的情况。此时, 模型中的 EDCAF[AC]和 QSTA 是同一个实体。

本文中模型的假设条件是: 理想信道, 不考虑传输错误, 只考虑协议本身的性能, 只要出现任意长度的帧重叠就是发生冲突; 数据帧的重传次数不受限制, 直到成功发送为止; 无论数据帧发送或重传多少次, 其发生冲突的概率恒定且相互独立; 每个 EDCAF[AC]或 QSTA 始终有数据帧要发送(饱和状态)并且数据帧到达(包括新数据帧和重发数据帧)是泊松过程; 不考虑隐藏终端问题和信道捕获效应; QSTA 的移动是有限的, 忽略 QSTA 发送和接收数据帧以及控制帧时的位置变化。

### 2.1 EDCAF[AC]吞吐率分析

图 1 是 EDCAF[AC]发送数据帧时经历的退避、重传、冲突直至成功发送的 Markov 链状态转移模型。定义  $b(t)$  表示某个 EDCAF[AC]在时刻  $t$  的退避计时器, 取值范围在  $[0, CW + 1]$ ; 定义  $s(t)$  表示某个 EDCAF[AC]在时刻  $t$  的退避级数, 取值范围在  $[0, m]$ ; 用变量  $j$  代替 AC 表示后台、尽力、视频或音频服务类型。把三者组合成  $b_{i,k,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{b(t), s(t), j\}$ ,  $i \in [0, m]$ ,  $k \in [0, CW_i + 1]$ ,  $j \in [0, 3]$ , 该 Markov 链可认为是稳态分布。

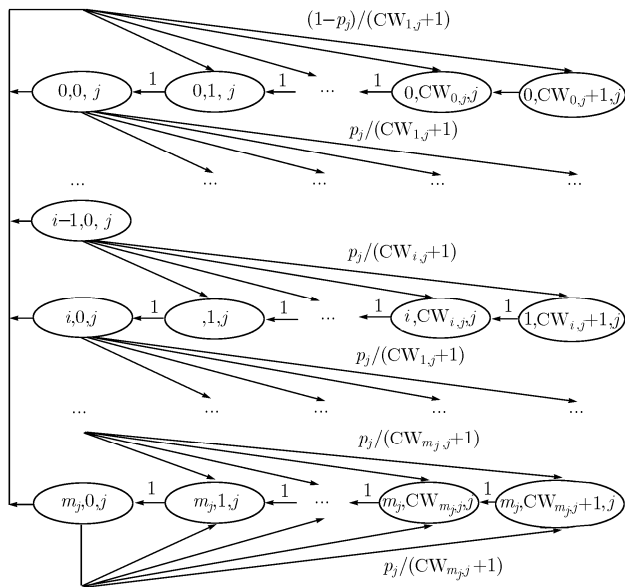


图 1 EDCAF[AC]的 Markov 链模型

根据假设条件: 无论数据帧发送或重传多少次, 其发生冲突的概率  $p_j$  恒定且相互独立。类似于文献[5]中的推导过程, 可以推导出

$$b_{0,0,j} = \frac{2(1-2p_j)(1-p_j)}{3(1-2p_j) + (CW_{0,j} + 1)[1-p_j - p_j(2p_j)^{m_j}]} \quad (1)$$

定义  $\tau_j$  为 QSTA 在任意时隙发送数据帧的概率。只有当退避时间计数器的值等于 0 时, 才能发送数据帧, 而不用考虑退避级数是多少, 于是

$$\tau_j = \frac{2}{4 + CW_{0,j} + p_j(CW_{0,j} + 1) \sum_{k=0}^{m_j-1} (2p_j)^k} \quad (2)$$

根据式(2)(见 2.2 节(3)的时隙长度分析)可计算出相应 EDCAF[AC]的饱和吞吐率:

$$S_j = \frac{E[\text{在一个时隙内成功发送的有效载荷}]}{E[\text{一个时隙的长度}]} \quad (3)$$

### 2.2 EDCAF[AC]时延分析

根据 EDCA 机制的原理, 可以把发送数据帧的时延分为两部分来考虑: 退避造成的时延和冲突造成的时延。下面通过构造 Markov 链模型的方法分别对退避时延和冲突时延进行分析。

(1)EDCAF[AC]的退避时延 由于 EDCAF 在第  $i$  阶的退避时隙数的取值是均匀分布在  $[1, CW_{i,j} + 1]$  范围内的随机整数, 所以取  $(CW_{i,j} + 2)/2$  为第  $i$  阶的平均退避时隙数。如图 2 所示, 状态  $(CW_{i,j} + 2)/2$ ,  $i \in [0, m_j]$  表示系统在此状态停留相应个时隙后再以图 2 中所示概率转移到其它状态, 从而可以推导出系统平均退避时隙数:

$$B_j = \frac{(CW_{0,j} + 1)(1-p_j)}{2} \cdot \sum_{k=0}^{m_j} (2p_j)^k + 2^{m_j-1} (CW_{0,j} + 1) p_1^{m_j+1} + \frac{1}{2} \quad (4)$$

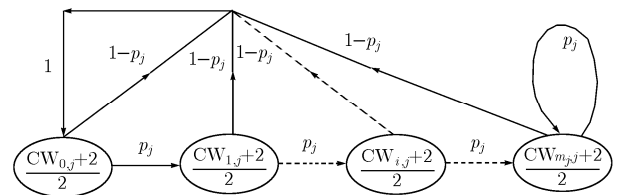


图 2 EDCAF[AC]的退避时延模型

(2)EDCAF[AC]的冲突时延 设状态  $T_{ci,j}$ ,  $i \in [0, m_j]$  表示发送冲突所造成的时延。当  $i = 0$  时, 表示未发生冲突数据帧就被成功发送, 因此  $T_{c0,j} = 0$ 。如图 3 所示, 状态  $0, T_{ci,j}$ ,  $i \in [1, m_j]$  表示系统在此状态停留时间 0,  $T_{ci,j}$  个时隙后再以图 3 中所示概率转移到相应状态。根据假设条件: 无论数据帧发送或重传多少次, 其发生冲突的概率  $p_j$  恒定且相互独立, 所以  $T_{cj} = T_{ci,j}$ 。从而可以推导出系统平均冲突时隙数:

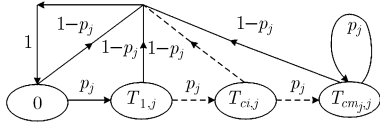


图 3 EDCAF[AC]的冲突时延模型

$$\text{Collide}_j = T_{cj} \cdot p_j / (1 - p_j) \quad (5)$$

(3)时隙长度的平均值 引入文献[5]中关于时隙长度的分析。一个时隙的长度不能简单地认为是  $\sigma$ 。一个时隙长度的平均值可以分成 3 部分：信道空闲的时间  $\sigma$ ，概率为  $P_\sigma = (1 - \tau_j)^n$ ；成功发送的平均时间  $T_{sj}$ ，概率为  $P_{sj} = n\tau_j \cdot (1 - \tau_j)^{n-1}$ ；冲突的平均时间  $T_{cj}$ ，概率为  $P_{cj} = 1 - (1 - \tau_j)^n - n\tau_j(1 - \tau_j)^{n-1}$ 。因此，可得平均时隙长度：

$$\text{Average}_\sigma = \sigma P_\sigma + T_{sj} P_{sj} + T_{cj} P_{cj} \quad (6)$$

(4)总时延 平均退避时隙数和平均冲突时隙数乘以平均时隙长度就是相应的平均退避时延和平均冲突时延。平均退避时延加上平均冲突时延就是总的平均时延。

### 2.3 EDCAF[AC]仿真

(1)仿真参数 本仿真采用 802.11b 的 DSSS 系统，参数如表 1 所示。其中 MAC header 为 MAC 报头和帧校验序列长度，取值为 32 个字节。表 2 是 EDCA 机制仿真数据，从表中可以看出  $m_j = 5$ 。

表 1 DSSS 系统参数

数据帧有效载荷: 8184bit	信道速率: 1Mbit/s
MAC header: 256bit	传播时延: 1μs
PHY header: 192bit	时隙: 20μs
ACK: 112bit+PHY header	SIFS: 10μs
RTS: 160bit+PHY header	DIFS/AIFS: 50μs
CTS: 112bit+PHY header	

表 2 EDCA 机制仿真数据

数据类型	优先级	AC=j	CW <sub>0,j</sub>	CW <sub>m<sub>j</sub>,j</sub>	AIFS[AC]
音频	最高	3	7	127	50μs
视频	较高	2	15	255	50μs
尽力服务	较低	1	31	511	70μs
后台服务	最低	0	63	1023	70μs

(2)吞吐量仿真 图 4 仿真 EDCAF[AC] 在基本访问方法和 RTS/CTS 方法下的归一化系统吞吐量。由于不同 AC 采用不同的最小退避窗口  $CW_0$ ，因此不同 AC 出现最大吞吐量时的 QSTA 数目不同。 $CW_0$  越大，出现最大吞吐量时的 QSTA 数目越大。

随着 QSTA 数目的增加，基本访问方法的饱和吞吐量迅

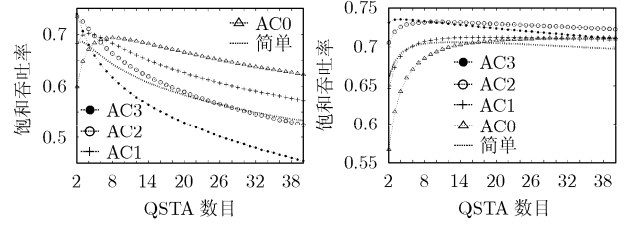


图 4 EDCAF[AC]和简单 EDCA 的吞吐量

速下降，这是因为基本访问方法是采用 2 次握手的 CSMA/CA，每次的冲突时间长度都为整个数据帧长度；RTS/CTS 方法的性能并不随着 QSTA 数目的增加而有显著下降，始终维持在 70% 左右，这是因为 RTS/CTS 方法是采用 4 次握手的 CSMA/CA，冲突时间长度仅为 RTS 或 CTS 帧，相对于基本访问方法来说发生冲突时对信道的浪费要小得多。

(3)时延仿真 图 5 仿真 EDCAF[AC] 在基本访问方法和 RTS/CTS 方法下的平均退避时延和冲突时延。很明显，冲突造成的时延比退避造成的时延要小得多。理论上，RTS/CTS 方法比基本访问方法多了两次握手过程，其相应的时延似乎要大些；然而，RTS/CTS 的冲突时间长度比基本访问方法要小很多，发生冲突的概率也要小。图 5 仿真结果显示 RTS/CTS 方法的退避时延和冲突时延比基本访问方法的要小。

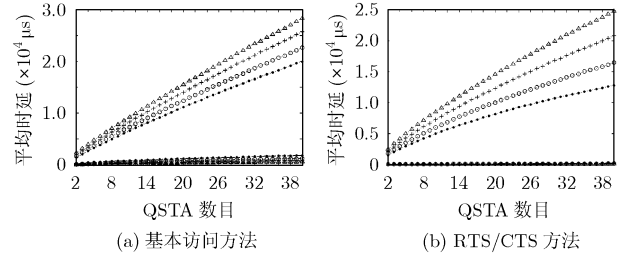


图 5 EDCAF[AC]的平均退避时延和冲突时延

### 3 简单 EDCA 模型

考虑 QSTA 内只有 1 个 EDCAF[AC]且各 QSTA 内的 EDCAF[AC]可以是不同优先级的情形。图 6 的模型表示当某个 QSTA 要发送数据时，按照数据帧的类型，依概率选择相应 EDCAF[AC]对该数据帧进行退避、重传直至成功发送。当然， $p_{\text{voice}} + p_{\text{vedio}} + p_{\text{effort}} + p_{\text{back}} = 1$ 。根据式(2)，可以推导出

$$\tau = p_{\text{voice}}\tau_3 + p_{\text{vedio}}\tau_2 + p_{\text{effort}}\tau_1 + p_{\text{back}}\tau_0 \quad (7)$$

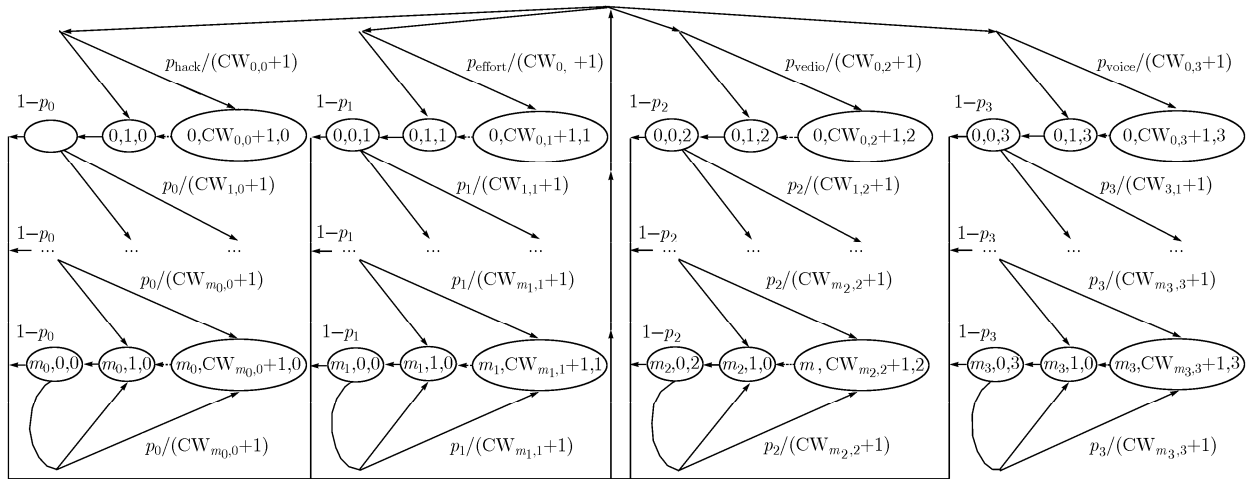


图6 简单EDCA的Markov链模型

图4 仿真简单EDCA在基本访问方法和RTS/CTS方法下的归一化系统吞吐量。在两种访问方法下，简单EDCA由于采用4种AC混合的方法，其吞吐量明显偏低。

图8 仿真简单EDCA在基本访问方法和RTS/CTS方法下的4种AC的总时延，可见基本访问方法的总时延比RTS/CTS方法的大些。

### 4 复杂EDCA模型

考虑最复杂的情况：每个QSTA内同时有4个不同的EDCAF[AC]。此时，既需要考虑内部虚拟冲突，又需要考虑外部冲突。

#### 4.1 内部虚拟冲突

若  $p_{voice} = p_{vedio} = p_{effort} = p_{back} = 1/4$  且QSTA数目为4，此时的简单EDCA模型就是一个QSTA内同时具有4个不同EDCAF[AC]的模型，以此来计算内部发生虚拟冲突的概率  $p_{in}$ 。

假设一个时隙内同时有2个以上AC发送数据帧的概率忽略不计。根据内部虚拟冲突处理规则，按式(8)可以计算出发生内部冲突时各AC需要退避的概率  $p_{in|AC}$ 。其中， $p_{AC0}$ ， $p_{AC1}$ ， $p_{AC2}$ 和 $p_{AC3}$ 是一个时隙内4种AC发送数据的全概率值，可以根据4种AC的最小退避窗口的比值来取值。

$$\begin{pmatrix} p_{in|AC3} \\ p_{in|AC2} \\ p_{in|AC1} \\ p_{in|AC0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p_{AC2}}{1-p_{AC3}} & \frac{p_{AC3}}{1-p_{AC2}} & 0 & 0 \\ \frac{p_{AC1}}{1-p_{AC3}} & \frac{p_{AC1}}{1-p_{AC2}} & \frac{p_{AC2}+p_{AC3}}{1-p_{AC1}} & 0 \\ \frac{p_{AC0}}{1-p_{AC3}} & \frac{p_{AC0}}{1-p_{AC2}} & \frac{p_{AC0}}{1-p_{AC1}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{AC3} \\ p_{AC2} \\ p_{AC1} \\ p_{AC0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

#### 4.2 外部冲突

从QSTA外部考虑。因为每个QSTA内只能有一个

EDCAF[AC]有机会参与外部竞争，所以外部模型也是一个简单EDCA模型。可以根据4种AC的最小退避窗口的比值来确定  $p_{voice} + p_{vedio} + p_{effort} + p_{back} = 1$ ，以此计算QSTA的外部冲突概率  $p_{out}$ 。

#### 4.3 综合冲突概率

根据概率论知识，利用式(9)可以分别计算4种AC的综合冲突概率：

$$\begin{pmatrix} p_{[all]AC3} \\ p_{[all]AC2} \\ p_{[all]AC1} \\ p_{[all]AC0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{[in]AC3} \\ p_{[in]AC2} \\ p_{[in]AC1} \\ p_{[in]AC0} \end{pmatrix} p_{in} + \begin{pmatrix} 1-p_{[in]AC3} \\ 1-p_{[in]AC2} \\ 1-p_{[in]AC1} \\ 1-p_{[in]AC0} \end{pmatrix} p_{out} \quad (9)$$

#### 4.4 仿真结果

图7 仿真复杂EDCA在两种访问方法下的归一化系统吞吐量。图中4种AC的吞吐量几乎相差倍数关系，这与AC的最小退避窗口值有关；将4种AC的吞吐量进行线性叠加就是复杂EDCA的吞吐量。图中还对复杂EDCA和简单EDCA的吞吐量做比较。采用基本访问方法时，复杂EDCA的吞吐量比简单EDCA的要高很多；采用RTS/CTS时，复杂EDCA的吞吐量比简单EDCA的要低，但相差不大。

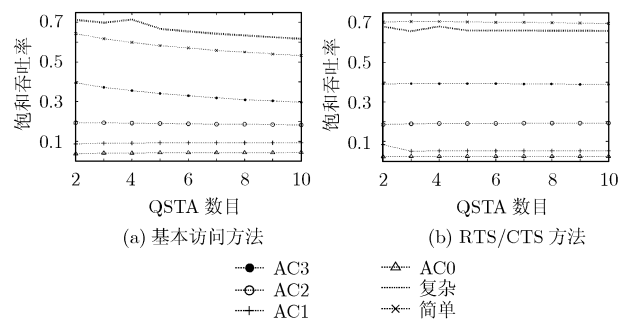


图7 简单EDCA和复杂EDCA的吞吐量

图8仿真复杂EDCA和简单EDCA的4种AC在两种访问方法下的总时延。图中显示,复杂EDCA机制的时延比简单EDCA机制的时延至少减少一倍多。QSTA数目越大,这个优势就越明显。

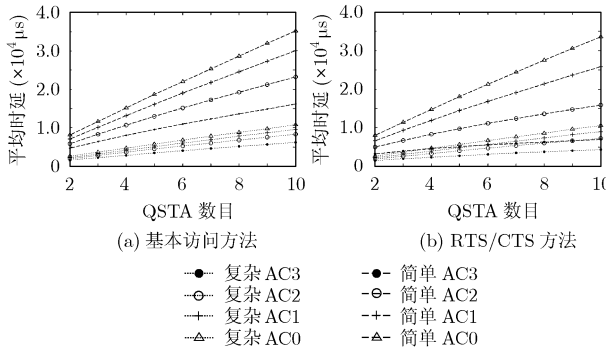


图8 简单EDCA和复杂EDCA的总时延

注意,因为复杂EDCA模型的一个QSTA中含有4个EDCAF[AC],所以图7和图8中简单EDCA模型的QSTA数目实际上是乘以4。

## 5 结束语

本文针对IEEE 802.11e协议的EDCA机制提出一种简单有效的性能分析模型。遵循由简到繁的原则,通过构造EDCAF[AC]和简单EDCA模型,最终构造出复杂EDCA模型,同时还构造了退避时延模型和冲突时延模型;借鉴Bianchi<sup>[5]</sup>的归一化饱和吞吐率的推导,先后推导出EDCAF[AC]和简单EDCA模型的时隙发送概率公式,并利用简单EDCA模型的计算公式分别计算内部虚拟冲突和外部冲突概率从而计算出综合冲突概率,最终仿真出饱和条件下复杂EDCA模型的吞吐率和时延。

仿真结果验证了历时5年多、10次修订最终成稿的IEEE 802.11e协议的EDCA机制的先进性:由于EDCA机制采用优先级分类和两级冲突,不仅可以优先保证音频和视频业务的吞吐率,而且可以大大降低系统平均时延,这对于多媒体业务在WLAN中的应用具有相当重要的意义。本文提出的EDCA机制两级冲突综合分析模型将有助于推动针对WLAN的QoS研究。

## 参考文献

[1] IEEE Std 802.11e-2005: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. Nov. 11, 2005.

[2] 刘乃安. 无线局域网(WLAN)-原理、技术与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 354-356.

Liu N A. Wireless Local Area Network-Theory, Technology and Applications. Xi'an: Press of Xi'an Electronic Science

and Technology University, 2004: 354-356.

[3] IEEE Std 802.11-1999 (R2003): Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Jun. 12, 2003.

[4] Bianchi G. IEEE 802.11 saturation throughput analysis. *IEEE Communication Letters*, 1998, 2(12): 318-320.

[5] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.

[6] Wu H, Peng Y, and Long K P, et al. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement. IEEE INFOCOM'2002, New York, USA, Jun. 2002, 2: 599-607.

[7] Ziouva E and Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis. *Computer Communications*, 2002, 25(3): 313-321.

[8] Hui J and Devetsikiotis M. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA by a unified model. GLOBECOM'2004, Dallas, USA, Nov. 29, 2004, 2: 754-759.

[9] Hui J and Devetsikiotis M. A unified model for the performance analysis of IEEE 802.11e EDCA. *IEEE Trans. on Communications*, 2005, 53(9): 1498-1510.

[10] Cali F, Conti M, and Gregori E. IEEE 802.11 wireless LAN: Capacity analysis and protocol enhancement. IEEE INFOCOM'98, San Francisco, USA, Apr. 2, 1998, 1: 142-149.

[11] Cali F, Conti M, and Gregori E. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2000, 8(6): 785-799.

[12] Tay Y C and Chua K C. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Network*, 2001, 7(2): 159-171.

[13] Xiao Y. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCF under saturation condition. IEEE ICC 2004, Paris, France, Jun. 22, 2004, 1: 170-174.

[14] Xiao Y. A simple and effective priority scheme for IEEE 802.11. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(2): 70-72.

[15] Kong Z N, Tsang D H K, and Bensaou B, et al. Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access. *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, 2004, 22(10): 209-2106.

[16] Tao Z F and Panwar S. Throughput and delay analysis for the IEEE 802.11e enhanced distributed channel access. *IEEE Trans. on Communications*, 2006, 54(4): 596-603.

严军荣: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为无线通信与通信网。

张顺颐: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 国家863通信主题高速宽带通信技术经济专家组成员, 主要研究方向为计算机通信网及IP技术。

龙华: 女, 1963年生, 教授, 主要研究方向为无线通信与通信网。

孙雁飞: 男, 1976年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为下一代网络性能监测与优化、多媒体网络通信、IP网络监测、管理与控制。